

粒子層の乾燥における限界含水率に関する研究

著者	宍戸 郁郎
号	667
発行年	1977
URL	http://hdl.handle.net/10097/9403

氏 名	し だ い ろ う 穴 戸 郁 郎
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 53 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 化学工学専攻
学 位 論 文 題 目	粒子層の乾燥における限界含水率に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 大谷 茂盛
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 大谷 茂盛 東北大学教授 斎藤正三郎 東北大学教授 只木 楨力

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

乾燥は化学工業をはじめとする各種工業において固・液分離操作の 1 つとしてよく用いられている。さて熱風の温・湿度，速度等の乾燥の外的条件すなわち乾燥条件と材料の種類，寸法，初期含水率等の乾燥の内的条件すなわち材料の性状との関係を明確に表現するものとしての所謂乾燥特性曲線は乾燥装置の設計あるいは最適運転条件の選定などに際しての不可欠な知識として使われてきた。この乾燥特性曲線は一般に乾燥速度が含水率によらずに一定とみなせる恒率期間と乾燥速度が含水率とともに減少していく減率期間とに大別でき，前者から後者への移行点を材料の平均含水率で表現し，これを限界含水率と称している。

本研究は粒子層における乾燥特性曲線を実験によらずに理論的に予測することを目的とし，その特性曲線における限界含水率の推算法について理論的・実験的な検討をおこない，更にいくつ

かの乾燥実験データから任意の乾燥条件下での限界含水率推算法について行った一連の研究をまとめたもので、全篇8章から成っている。

第2章 粒子層内における水分拡散係数の実験的検討

一般に粒子層内における水分移動はその速度があまり速くなければ次のDarcyの法則が適用できる。乾燥の場合にもDarcy則が適用できるものとする。水分移動は次のように表わされる。

$$G_w = -K_w \frac{\rho_w g_c}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (1)$$

但し

$$P = P^0 - p + \rho_w \frac{g}{g_c} h \quad (2)$$

さて一般にサクシヨンプレッシャー p と含水率 ϕ との間には履歴現象のあることが知られている。ここで乾燥中の粒子層内では気圧 P^0 は一定かつ温度は一樣でしかも層内のいたる所で減水現象のみが生じているものと仮定すると、サクシヨンプレッシャーは含水率の一価関数として取り扱うことができる。すると次式を得る。

$$G_w = \left(K_w \frac{\rho_w g_c}{\mu} \frac{dP}{d\phi} \right) \frac{\partial \phi}{\partial x} - K_w \frac{\rho_w^2 g}{\mu} \quad (3)$$

$$= -\rho D \frac{\partial \phi}{\partial x} - K_w \frac{\rho_w^2 g}{\mu} \quad (4)$$

但し

$$D \equiv -K_w \frac{\rho_w g_c}{\mu} \frac{dP}{d\phi} \quad (5)$$

さて(4)式右辺第2項は重力による水分移動を表わしているが、これを見捨てるような場合には、(4)式はいわゆるFickの拡散式にはかならない。ここで D は(5)式で定義され乾燥ではこれを水分拡散係数と称している。第2章ではこの水分拡散係数について定常乾燥実験によってその実測値を求め、次のような実験式を得た。

$$\text{Sand)} \quad D = 2.5 \times 10^{-5} \exp(50\phi) \quad \text{for } \phi < 0.15 \quad (6)$$

$$\text{Brick)} \quad D = 4.6 \times 10^{-6} \exp(47\phi) \quad \text{for } \phi < 0.2 \quad (7)$$

また簡単な実験をおこない、粒子の種類が同じであってもその空隙の構造が異なれば水分拡散係数の値も異なることを示した。以下の章における試料は本章で水分拡散係数の実測値を得た粒子層のみを検討の対象とした。

第3章 乾燥条件が一定の場合における限界含水率の理論的解析

本章では乾燥用の熱風が多量にあり乾燥が進行しても空気側の温・湿度変化は無視し得るような

場合すなわち乾燥条件一定の場合についての限界含水率の理論的取り扱いを行っている。

まず水分拡散係数が一定とみなせる理想的な場合について厳密解を得、さらに種々のモデルとを比較し、次のような簡単な式によって限界含水率を表現できることを示した。

$$\phi_c/\phi_i = \begin{cases} 1 - \frac{\pi}{4} / N & \text{for } N \geq 2 \\ N / 3 & \text{for } N < 2 \end{cases} \quad (8)$$

where $N \equiv \text{Ni b} / \rho \phi_i D$

ついで実際の粒子層でみられるように水分拡散係数が高い含水率依存性を示す場合についてその関数形を種々想定して理論解析を行った。その結果、初期含水率における水分拡散係数 $D(\phi_i)$ と限界表面含水率時の水分拡散係数 $D(\phi_{s,c})$ との比 E をパラメーターに選ぶことができ、同じ乾燥速度であっても E の値が大きければ限界含水率の値も大きくなることを明らかにした。また乾燥速度が速い場合には試料層厚さを半無限とした semi-infinite モデルで、また乾燥速度が遅い場合には moisture flux を深さ x の 1 次式と仮定した linear-flux モデルで限界含水率を理論的に表現できることを示した。更に表現の簡単な半理論式である簡易推算式についても検討を行った。その結果極端に乾燥速度が速い時や水分拡散係数比 E が大きい場合を除いては次の簡易式によっても簡単に限界含水率を推算できることを示した。

$$N_\ell = \begin{cases} \frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{1 - \phi_c/\phi_i} \right) \left(\frac{\ell_n E}{E - 1} \right)^{1 - \phi_c/\phi_i} & \text{for } \phi_c/\phi_i \geq 0.5 \\ 3 (\phi_c/\phi_i) \left(\frac{\ell_n E}{E - 1} \right)^{1 - \phi_c/\phi_i} & \text{for } \phi_c/\phi_i < 0.5 \end{cases} \quad (9)$$

where

$$N_\ell \equiv \text{Ni b} / \rho \phi_i D_\ell$$

$$D_\ell \equiv \frac{D(\phi_i) - D(\phi_{s,c})}{\ell_n \frac{D(\phi_i)}{D(\phi_{s,c})}}$$

第 4 章 乾燥条件が一定の場合における限界含水率の実験的検討

本章では乾燥空気の時・湿度を一定とした場合の粒子層の乾燥について実験的な検討を加えた。まず従来あまり検討のなされていなかった限界含水率に影響をおよぼす種々の因子（乾燥速度、試料厚さ、初期含水率、水分拡散係数等）について検討を行った。その結果乾燥速度が速く、試料が厚く、初期含水率が大きく、さらに水分拡散係数の小さい場合は限界含水率は大きくなることが明らかにされた。また現在までに実測値の得られていなかった乾燥時における表面含水率

の変化を赤外線 2 色水分計により連続測定を行った。その結果乾燥条件（即ち N_L ）の大きな時には semi-infinite モデルによる表面含水率の理論値と破碎レンガ粒子層の実測値の両者は乾燥終期を除いて良い一致がみられた。しかしながら砂粒子層の場合には乾燥初期において両者は一致せず理論値は実測値よりも大きな値を示した。これは(4)式の重力項を無視したためと考えられ、今後重力項をも加味したモデルの開発が必要と思われる。

限界表面含水率については従来 2 つの説があったが本報で実測値を得、これが林の求めた懸垂含水率にはば等しいことを明らかにした。そこで限界含水率の推算にあたっては限界表面含水率の値としては懸垂含水率にとるのが妥当であるが本実験範囲内においては平衡含水率にとっても推算上の誤差は小さいことを示した。

更に第 3 章における限界含水率の理論的推算値と実測値とを比較した。その結果数値解による推算値と実測値は $\pm 10\%$ 程度の精度で一致し、本法による推算の妥当性が明らかにされた。また(10)式で示すように semi-infinite モデル，linear-flux モデルの両モデルを用いることにより数値解の場合とほぼ同程度の精度で限界含水率を推算できることを示した。

$$\phi_c/\phi_i = \begin{cases} 1 - \frac{\tau_c}{N_L V_{s,c} \ln E} & \text{for } N_L \geq 1 \\ \text{where} \\ V_{s,c} = \frac{E-1}{E} \\ \frac{1}{\ln E} \left\{ -2 + \sqrt{\frac{a+1}{a}} \ln(2a+1+2\sqrt{a^2+a}) \right\} & \text{for } N_L < 1 \\ \text{where} \\ a = \frac{1}{2} (E-1) N_L \end{cases} \quad (10)$$

更に表現の簡単な(9)式で表わされる簡易推算式によってもある程度限界含水率の推算ができることを示した。

第 5 章 乾燥空気側の湿度が時間により変化する場合の限界含水率の理論的解析

一般に用いられている連続式熱風乾燥装置内における試料にとっては乾燥空気側の湿度などが時間（あるいは場所）により変化する。このような場合には恒率乾燥期間は存在せず、したがって乾燥速度と表面水分蒸発速度が一致しなくなった点を限界含水率と定義した。本章ではかかる乾燥条件が変化する場合の限界含水率について理論解析を行った。まず第 3 章と同様に水分拡散係数が一定とみなせる理想的な場合について検討した。その結果このような場合には熱風条件変化をあらわすパラメーター（以下熱風パラメーターと称する） α の値により限界含水率の値は異

なり、この値が大きくなれば限界含水率も大きくなることが明らかにされた。また並流式乾燥装置の場合には乾燥条件によっては限界点の得られなくなる場合も生じることが示された。更に熱風パラメーター α の絶対値の大きな時あるいは乾燥速度 N_{in} （材料入口部での無次元乾燥速度）の大きな場合には semi-infinite モデルにより限界含水率を推算できることが示された。

次に水分拡散係数が含水率の関数の場合について理論解析を行った。この場合には熱風パラメーター α の他に水分拡散係数比 E によっても限界含水率が変化することが明らかにされた。またこの場合も α あるいは N_{lin} （材料入口部で $D(\phi_1)$ と $D(\phi_{s,c})$ との対数平均 D_ℓ で無次元化した乾燥速度）の大きな場合には semi-infinite モデルによって限界含水率を理論的に推算できることを示した。

第 6 章 乾燥空気側の湿度が時間により変化する場合の限界含水率の実験的検討

実際の工業でよく用いられている連続式熱風乾燥装置などによる精度ある測定は困難なために、第 4 章で用いた実験装置に乾燥空気側の湿度を時間的に変化させるべく、若干の装置を試作して付け加え実験を行った。かかる場合は前章で述べた如く恒率期間は存在せず、限界含水率は表面蒸発期間から内部蒸発期間への移行点として定義され、したがって乾燥条件一定の場合のように重量変化が直線から偏倚しはじめる点をもって限界点を決定するわけにはいかない。そこで充分濡れている粒子層の表面からの水分蒸発速度を実験的に求め、試料層の乾燥速度がその表面蒸発速度よりも小さくなりはじめる点をもって限界含水率の実験点とした。

このようにして求めた限界含水率の値は乾燥条件が一定の時とは異なることが明らかにされ、しかも熱風パラメーター α および水分拡散係数比 E の値によって乾燥条件一定の場合と変化する時の両者間での限界含水率の差の程度は異なることが示された。

次に第 5 章での限界含水率の理論的推算値と実測値との比較を行った。まず数値解による推算値と実測値とでは良い一致がみられ本法による限界含水率推算法の妥当性が確かめられた。また semi-infinite モデルによっても水分拡散係数比 E が比較的小さな場合には良く推算できることが示されたが E が 10^3 程度となると項数不足のため実際に比較は行えなかった。

第 7 章 水分拡散係数が未知の場合における限界含水率の推算方法

第 3 章から第 6 章までは既に水分拡散係数が求められている場合の取り扱いであった。ここで乾燥材料は多種多様でありかならずしも水分拡散係数が求められているとは限らない。本章ではこのように水分拡散係数が未知の場合における限界含水率を推算する方法について検討した。

まず特殊な場合として水分拡散係数の値自身は未知であるがその関数形は既知の場合について乾燥実験データから水分拡散係数を推算する方法について検討した。第 1 の方法として表面含水

率の経時変化実測値を用いる方法，第2として限界含水率の実測値を用いる方法の2つについて検討を行った。第1の方法では実測値と semi-infinite モデルによる理論値とを比較することにより水分拡散係数を推算しているが，破碎レンガ粒子層で乾燥速度が比較的速い時には推算値と実測値は良く一致した。しかし第4章で示したように砂粒子層では重力項を無視したことによる誤差のため良くは推算できないことが判った。破碎レンガ粒子層の場合，得られた水分拡散係数推算値を用いて他の乾燥条件での限界含水率を(10)式で推算したところ実測値と良い一致がみられた。この方法では原理上は唯一度の乾燥実験によって水分拡散係数の推算が可能であるが実際には semi-infinite モデルを満足するような条件すなわち N_g が比較的大きい場合の実験値を用いなければならず，事実上は乾燥条件の異なる複数回の実験が必要である。また表面含水率を測定するためには特別な計測装置（本報では赤外線2色水分計）を使用しなければならず手軽さという点からは少々難点が残る。

第2の方法は表面含水率に比べ比較的容易に測定できる限界含水率の実測値と第4章で示したように semi-infinite モデルあるいは linear-flux モデルによる推算値とを比較することにより水分拡散係数の推算を行った。この方法による推算値と実測値は破碎レンガ粒子層，砂粒子層いずれの場合にもよく一致した。得られた水分拡散係数の推算値を用いて(10)式により得られた限界含水率の推算値と実測値とはよい一致がみられた。

ついで一般の水分拡散係数の関数形すら未知の場合についての水分拡散係数を表面含水率の経時変化から推算する方法について検討した。その結果第2章で得られた実験式(7)式がかならずしも最良の近似とはかぎらないことが示されたが，これが表面含水率測定上の誤差に起因するか水分拡散係数測定上の誤差によるものかは明らかではなく今後の詳細な研究が必要であろう。得られた水分拡散係数推算値を用いて他の乾燥条件下での限界含水率の推算を試みた結果実測値と比較的よく一致することが示された。

第8章 結 論

本章は結論であり本研究の結果を総括した。

◆ 使用記号 ◆

b : 試料厚さ [m]

D : 水分拡散係数 [m^2/hr]

E : 水分拡散係数比

G_w : 水分移動速度 [$kg/m^2 \cdot hr$]

h : 基準面からの高さ $[m]$
 N_i : 恒率乾燥速度 $[kg/m^2 \cdot hr]$
 N : 無次元乾燥速度 $(\equiv N_i b / \rho \phi_1 D)$
 x : 深さ $[m]$
 α : 熱風パラメーター $(\equiv \frac{ka v}{G} \frac{b^2}{D})$
 K_w : 透過率 $[m^2]$
 μ : 粘度 $[kg/m \cdot hr]$
 ρ : 密度 $[kg/m^3]$
 τ : 無次元時間

(添 字)

c : 限界点
 i : 初期状態
 ℓ : 対数平均
 s : 表面状態

審 査 結 果 の 要 旨

乾燥装置の設計および操作条件の決定に際しては、乾燥速度対含水率で規定される乾燥特性曲線が不可欠なものとして要求される。この特性曲線は一般には恒率乾燥期間と減率乾燥期間とに分けられ、その境目の含水率を限界含水率と呼び、この値は従来実験によりその都度求められてきた。限界含水率は材料の性状および乾燥条件によって異なるが、これを理論的に推算した研究はほとんどみあたらない。本論文は粒子層の乾燥における限界含水率を理論的に解析することに成功した一連の研究をまとめたもので、全篇8章よりなる。

第1章は緒論であり、本研究の目的を述べている。

第2章では乾燥における水分移動機構を検討する際の基礎的数値である水分拡散係数を実験的に求め、以下の解析に使用している。

第3章では乾燥空気が多量にあり、乾燥が進行しても空気側の温度、湿度が変化しない、すなわち乾燥条件が一定の場合における理論的解析を、水分拡散係数が含水率によって変化する場合をもふくめて行い、乾燥速度の大小によって二つのモデルを設定し、限界含水率の推算に成功している。

第4章では乾燥条件が一定の場合、限界含水率に影響をおよぼす諸因子について実験的検討を行い、前章における理論的解析の妥当性を立証している。なお従来実測値の得られていなかった限界表面含水率を測定し、限界含水率の理論的推算に必要なこの値について考察している。

第5章では乾燥条件が時間的に変化する場合の理論的解析を行い、第6章ではその場合における実験結果について述べている。かかる場合には恒率乾燥期間は存在しないため、乾燥速度と表面水分蒸発速度とを比較しその両者の速度がずれる点をもって限界含水率と規定し、推算値と実測値とはほぼ一致することを示し、向流型連続式熱風乾燥装置などにおける操作上の指針を得ている。

第7章では水分拡散係数が未知の場合における限界含水率の推算法を検討している。

第8章は結論である。

以上要するに、本論文は従来その都度実験によってのみ求められていた乾燥特性曲線における限界含水率について理論的解析を行い、その推算法を確立し、粒子層の乾燥機構を明らかにすると共に乾燥装置の設計ならびに操作上に必要な知見を提供しており、化学工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。